

Micorremediación: el caso de *Pleurotus ostreatus* sobre polímeros sintéticos como el acetato de celulosa

Mycoremediation: the case of *Pleurotus ostreatus* on synthetic polymers such as cellulose acetate

Isabel Barrantes-Jiménez¹, Ericka Marín-Sandí²,
Monica Murillo-Murillo³, David Rojas-Rojas⁴, Sergio
Vallecillo-Cedeño⁵, Sebastián Valverde-Rojas⁶

Fecha de recepción: 22 de febrero, 2023

Fecha de aprobación: 8 de junio, 2023

Barrantes-Jiménez, I; Marín-Sandí, E; Murillo-Murillo, M;
Rojas-Rojas, D; Vallecillo-Cedeño, S; Valverde-Rojas, S.
Micorremediación: el caso de *Pleurotus ostreatus* sobre polí-
meros sintéticos como el acetato de celulosa. *Tecnología en
Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 15-22.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6478>

- 1 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 2 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 3 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: momurmur24@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-2721-1863>
- 4 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 5 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 6 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Palabras clave

Fungi; biodegradable; acetilsterasa; plástico; colillas de cigarro.

Resumen

Los hongos pueden ser utilizados para remover o degradar compuestos contaminantes por medio de un proceso de micorremediación. En ocasiones incluso de manera más eficiente que los procariontes, por lo que pueden ser utilizados para combatir la contaminación de polímeros no biodegradables. El acetato de celulosa es un material comúnmente utilizado en la fabricación de colillas de cigarrillos, por lo que al ser descartado genera contaminación. El hongo *Pleurotus ostreatus* tiene la capacidad de degradar acetato de celulosa por medio de las enzimas que secreta. La enzima se encarga de hidrolizar el grupo acetilo del acetato de celulosa mientras que enzimas celulolíticas degradan el esqueleto de celulosa en azúcares, polisacáridos o celobiosa. Además del acetato de celulosa, este hongo es capaz de degradar otros polímeros convencionalmente no biodegradables por lo que tiene el potencial de ser utilizado para reducir la contaminación. El cultivo del hongo a gran escala ha demostrado ser más viable económicamente que los métodos de tratamiento convencionales de polímeros no biodegradables lo cual es una ventaja adicional que presenta.

Keywords

Fungi; biodegradable; acetyesterase; plastic; cigarette butts.

Abstract

Fungi can be used to remove or break down contaminating compounds through a mycoremediation process. Sometimes even more efficiently than prokaryotes, so they can be used to reduce contamination from non-biodegradable polymers. Cellulose acetate is a plastic normally used in the manufacture of cigarettes, so when it is discarded it generates pollution. The *Pleurotus ostreatus* fungus has the ability to degrade cellulose acetate through the enzymes it secretes. The enzyme is responsible for hydrolyzing the acetyl group of cellulose acetate while cellulolytic enzymes break down the cellulose skeleton into sugars, polysaccharides or cellobiose. In addition to cellulose acetate, this fungus is capable of breaking down other conventionally non-biodegradable polymers, so it has the potential to be used to reduce pollution. Large-scale cultivation of the fungus has proven to be more economically viable than conventional non-biodegradable polymer treatment methods, which is an additional advantage it presents.

Introducción

Los hongos son organismos eucariontes que se alimentan de fuentes de carbono, asociada con una alta tasa de degradación, ya que en su etapa micelial, secretan enzimas extracelulares y ácidos que le dan la capacidad de descomponer compuestos orgánicos más complejos[1]. Además de degradar compuestos de carbono, tienen un papel importante en biotecnología ambiental, gracias a su capacidad de lixiviación, recuperación y detoxificación de metales, degradación de xenobióticos y contaminantes orgánicos [2].

La micorremediación es un tratamiento biológico, en el que de manera sustentable se remueven hidrocarburos aromáticos policíclicos nocivos, compuestos orgánicos con halógenos, hidrocarburos de petróleo, colorantes, pesticidas y compuestos inorgánicos; mediante la utilización de hongos[3]. Este tratamiento biológico es muy eficaz y es superior a las bacterias en su rendimiento, ya que son más competentes en cometabolismo y bioacumulación [4].

Una serie de cepas fúngicas han demostrado ser degradadores de contaminantes importantes. La degradación de 2,4-diclorofenol es posible con el hongo *Lentinula edodes*[5]. El 2,4-diclorofenol se encuentra en el lugar 243 de los compuestos fenólicos con mayor toxicidad según La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)[6], y al ser un compuesto orgánico persistente, su micorremediación resulta de gran importancia ambiental.

Se ha estudiado también la micorremediación del hongo *Pleurotus pulmonarius* con residuos radioactivos de base celulósica, mostrando altas tasas de degradación[7]. Adicionalmente, han encontrado otros usos posteriores a la degradación como se señala en *Cementation of Bioproducts Generated from Biodegradation of Radioactive Cellulosic-Based Waste Simulates by Mushroom* de Eskander *et al.*[7], en donde los productos de la degradación se están estudiando para generar cemento Portland.

Otro caso estudiado es el de la degradación del verde malaquita, un compuesto orgánico utilizado como colorante[8]; el trabajo de Yogita *et al.*[9] demostró la degradación de este colorante con los hongos *Jelly sp.*, *Schizophyllum commune* y *Polyporus sp.*, durante 10 días y con hasta 99.7% de efectividad.

Por otra parte, el hongo *Pleurotus pulmonarius* se ha caracterizado como una especie capaz de degradar petróleo, y por ello es una solución para la biorremediación de suelos contaminados por petróleo, teniendo un impacto positivo en el ambiente[10]. En un estudio en 2015 Villacres Manzano demostró cómo el hongo *Trametes versicolor* ha generado tasas excelentes de biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Dichos hidrocarburos son un grupo de más de 100 sustancias que se forman durante la combustión incompleta del carbón, petróleo y gasolina, además de otras sustancias orgánicas[11].

Se ha demostrado además que el hongo *Melanized fungi*, es capaz de absorber metales pesados y contaminantes radioactivos de efluentes industriales[12]. Así mismo, cepas de *Pleurotus platypus*, *Agaricus bisporus* y *Calocybe indica*, han demostrado su capacidad como bioabsorbentes los iones Cobre, Zinc, Hierro, Cadmio, Plomo y Níquel en soluciones acuosas[13].

De esta manera, diferentes cepas fúngicas han demostrado generar beneficios en cuanto a micorremediación y aportan a los procesos biológicos y químicos ya existentes, puesto que pueden biodegradar contaminantes que no habían sido posibles de remover o reducir mediante métodos químicos o con otros organismos como procariotas[14].

Degradación del acetato de celulosa por *P. ostreatus*

El acetato de celulosa (CA) tradicionalmente se consideró un polímero no biodegradable, pero a principios de los noventas se demostró su biodegradabilidad [15, 16].

El primer paso para la degradación del CA, al igual que el paso determinante en la velocidad de este proceso, es la escisión del grupo acetilo [17]. Las acetil esterasas han sido reconocidas como enzimas capaces de hidrolizar este grupo, específicamente acetil xilano esterasas [17]. El xilano y su forma acetilada, el acetil xilano, se encuentran en muchas plantas [18]. El xilano es un componente de la hemicelulosa, un compuesto que los hongos saprofitos se han adaptado a degradar [19], y el acetil xilano comparte con el CA, tanto la similitud de ser un polisacárido con un esqueleto de glucosa esterificado con grupos acetilo, como también que sus sustituyentes acetilo están dispuestos de forma idéntica en el plano ecuatorial [20]. Por lo que enzimas capaces de desacetilar este compuesto son las candidatas perfectas para catalizar la reacción equivalente en el CA, y en efecto, este polímero ha sido reportado como sustrato de diferentes acetil xilano esterasas [21].

Una vez el grupo acetilo del CA ha sido removido, el siguiente paso es degradar el esqueleto de celulosa. *P. ostreatus* es conocido por su capacidad para degradar celulosa y lignina mediante el uso de enzimas extracelulares [22], así que esta etapa del proceso es más rápida. Estas enzimas celulolíticas son las celulasas/glucanasas, las cuales normalmente degradan la celulosa en las paredes celulares de las plantas [23, 24]. Dentro de esta categoría de enzimas se encuentran las endoglucanasas y exoglucanasas, la diferencia principal entre estos dos tipos de enzimas es que las endoglucanasas escinden de manera aleatoria la celulosa, produciendo azúcares más pequeños y polisacáridos oligoméricos [23], mientras que la exoglucanasa actúa desde los extremos reductores o no reductores de una cadena de celulosa para liberar celobiosa como producto principal [25]. Para la degradación del CA, se prefiere la exoglucanasa aunque de hecho, existen propiedades sinérgicas entre las exoglucanasas y acetil esterases para la destrucción de este polímero [21].

Otras tres clases de enzimas relevantes presentes en *P. ostreatus* con capacidad de degradación son: lignina peroxidasas, peroxidasas dependientes de manganeso y lacasas [26]. Su principal mecanismo de acción es la creación y uso de radicales libres para destruir polímeros sintéticos como el CA [26].

Uso de *P. Ostreatus* para la degradación de otro tipo de polímeros

Cabe aclarar que el uso del hongo *P. Ostreatus* a nivel industrial no es algo nuevo, ya que diferentes compañías se han desempeñado en la biodegradación de polímeros, usando las propiedades químicas y biológicas del hongo. Ejemplo de ello, es una empresa mexicana encargada de la recolección y degradación de colillas de cigarro. Tan solo en México se desechan 5 mil millones de colillas al año, equivalentes a 22,150 toneladas de basura, de acuerdo con la Secretaría de Salud. Estos desechos representan entre 30% y 40% de los residuos recogidos en actividades de limpieza urbana y costera [27].

Ahora bien, expandiendo el uso del hongo en la degradación de otros polímeros, se han realizado investigaciones con el Polietileno Verde, hecho a partir del etileno obtenido de la caña de azúcar. Da Luz y colaboradores (2013) explican que *P. ostreatus* puede degradar y producir enzimas utilizando desechos plásticos oxo-biodegradables sin tratamiento físico previo [28]. Se explica también que *P. ostreatus* es un hongo lignocelulolítico que puede utilizar lignina, celulosa y hemicelulosa como fuentes de carbono y energía [29,30]. Este hongo ha sido utilizado en la degradación de residuos agroindustriales [29,32] la biorremediación de contaminantes [31] y el blanqueo de pulpa [32]. La capacidad de los hongos lignocelulolíticos para degradar una amplia gama de compuestos, está relacionada con la alta eficiencia de su sistema enzimático.

Tratando de relacionar las propiedades de los lignocelulolíticos con la degradación de los plásticos oxodegradables y cómo ocurren estos procesos, un argumento se basa en la acción de este grupo de enzimas en un proceso cometabólico [28]. Los procesos cometabólicos se utilizan comúnmente en el tratamiento de compuestos recalcitrantes, donde se agrega una fuente de carbono para inducir la síntesis de ciertas enzimas, que degradan los sustratos naturales así como también contaminantes o residuos no deseados [33]. Otro tipo de polímero del cual se han realizado estudios para verificar la efectividad respecto a su degradación, es el poliestireno expandido (EPS) siendo este un termoplástico utilizado en la industria para la construcción, aislamiento térmico, acústico y el empaque de objetos y alimentos [34]. Todos estos polímeros comparten similitudes en sus propiedades que hacen que sean degradables en contacto con el hongo, sin embargo, cabe aclarar que intervienen factores como la temperatura, humedad, tiempo, entre otros, que puedan modificar el metabolismo del hongo sobre el polímero.

Impacto Ambiental y económico sobre los medios de degradación de *P. ostreatus*

El efecto degradador de *P. ostreatus* sobre el acetato de celulosa en las colillas de cigarro es de gran relevancia puesto que estas representan un problema medio ambiental del cual no se aprecia su magnitud [35]. Una sola puede contaminar hasta 50 litros de agua y, se calcula que pueden durar hasta 25 años en degradarse [36]. El impacto en la industria de la agricultura del arroz, se destaca por el uso de *P. ostreatus* como microorganismo para el pretratamiento fúngico, para la deslignificación del polímero de lignocelulosa (polímero que compone la cascarilla de arroz) propiciando la modificación para la conversión de biometano a partir de la biomasa lignocelulósica como una de las mayores fuentes de energía renovable a partir de biomasa en el mundo [37, 38], esto porque se ha encontrado factores que afectan la hidrólisis enzimática de la lignocelulosa [39], provocando a que a nivel industria/economía no se aproveche el desecho de arroz y a nivel ambiental produzcan contaminación [40]. Así mismo, la industria de polietileno verde ha utilizado el organismo *P. ostreatus*, ya que a pesar de que estos plásticos son de fácil degradación, no hay información disponible sobre la vida media o la tasa de degradación cuando se desechan en el medio ambiente y a su vez, se ha demostrado facilitar la mineralización del polímero [41], debido al complejo de enzimas lignocelulolíticas que produce el hongo basado en el mismo principio de la degradación del acetato de celulosa [42, 43].

Sustentabilidad ambiente-economía del cultivo *P. ostreatus*

Según Peña (2017) [14], la diferencia en costos de aplicación entre los métodos de tratamiento convencionales y los relacionados con organismos biológicos, es bastante considerable, además de implicar una menor inversión económica, se garantiza la protección de la calidad del medio ambiente, para funcionar dentro de los límites del ecosistema.

Además de sus beneficios ambientales, el hongo *P. ostreatus*, tiene gran factibilidad económica para ser cultivado a gran escala para su utilización. Refiriéndose a la investigación en 2019 [44], donde se indica que se obtuvo una tasa interna de retorno (TIR) del 18%, dando resultados favorables con respecto a la inversión y apuntando hacia una viabilidad económica sustentable.

Actualmente algunas empresas utilizan sistemas que generan ganancias económicas a través de prácticas que favorecen la disminución de la contaminación. Con el caso de las colillas de cigarro, se emplean distintos modelos de negocio, el primero es el de recolección voluntaria, donde múltiples establecimientos se organizan para colocar contenedores de desecho, además de coordinar su recolección, obteniendo beneficios como certificaciones y ser identificados como “empresa responsable” con sus desechos; como segunda línea de negocio, la venta de contenedores de desecho a empresas, instituciones gubernamentales, entre otras, con el servicio de instalación y recolección, una tercera línea es la venta de productos a partir de la pulpa de celulosa biodegradable, como macetas (hechas con 25 colillas), lápices (10 colillas), hojas de papel y hasta bisutería. A partir de esta idea, surgió una cuarta línea de negocio con un modelo B2B; la venta de pulpa de celulosa, a fábricas de papel y cartón, la cual se ha convertido en la vertiente más rentable, ya que se oferta como materia prima y a gran escala [27].

Consideraciones finales

Se cuenta con suficiente evidencia reportada sobre la capacidad de *P. Ostreatus* para la degradación de polímeros como el CA. La capacidad de micorremediación de este hongo y su viabilidad económica le dan el potencial de utilizarse para degradar desechos y contaminación debido a biopolímeros. El integrar organismos vivos como el hongo *P. Ostreatus* en distintos

sectores industriales lleva a nuevas oportunidades de implementar procesos biológicos que beneficien al ambiente. Adicionalmente, en el ámbito de la enzimología es importante un mayor desarrollo de estudios para comprender de forma más específica la degradación biológica de polímeros sintéticos.

Referencias

- [1] L. Romero-Bautista, M. Á. Islas-Santillán, M. López-Herrera, N. Ayala-Sánchez, and I. E. Soria-Mercado, "Los hongos poliporoides de la subcuenca del río Metztlán, Hidalgo, México," *Estudios en Biodiversidad*, vol. 1, pp. 196–209, 2015.
- [2] G. Gadd, "Mycotransformation of organic and inorganic substrates", *Mycologist*, vol. 18, no. 2, pp. 60-70, 2004. Disponible: 10.1017/s0269915x04002022. [Consultado: 03-oct-2022].
- [3] M. Mathur, P. Gehlot, "Mechanistic evaluation of bioremediation properties of fungi", In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, vol 1, pp. 267–286, 2020.
- [4] M. Medaura, M. Guivernau, F. Boldú, X. Moreno y M. Viñas, M. (2013). "Mikorremediación y su aplicación para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos pesados", *V REDISA*, vol 1, pp. 1-7, 2013.
- [5] S. Tsujiyama, T. Muraoka y N. Takada, "Biodegradation of 2,4-dichlorophenol by shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using vanillin as an activator", *Biotechnology Letters*, vol. 35, no. 7, pp. 1079-1083, 2013. Disponible: 10.1007/s10529-013-1179-5 [Consultado: 03-oct-2022].
- [6] L. E. Miguel Sánchez, G. Martínez Villa, J. Mentado Morales, M. E. Codero Sánchez, L. G. Zárate López, A. Regalado Méndez, y E. Peralta Reyes, "DEGRADACIÓN ELECTROQUÍMICA DE 2,4-DICLOROFENOL EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO FM01-LC," *Memorias del XXXVIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ*, vol. I, pp. 1–5, Agosto. 2017.
- [7] S. Eskander, S. Abd El-Aziz, H. El-Sayaad and H. Saleh, "Cementation of Bioproducts Generated from Biodegradation of Radioactive Cellulosic-Based Waste Simulates by Mushroom", *ISRN Chemical Engineering*, vol. 2012, pp. 1-6, 2012. Disponible: 10.5402/2012/329676 [Consultado: 03-oct-2022].
- [8] A. Verma et al., "Graphite modified sodium alginate hydrogel composite for efficient removal of malachite green dye", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 148, pp. 1130-1139, 2020. Disponible: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.142 [Consultado: 03-oct-2022].
- [9] R. Yogita, S. Simanta, S. Aparna y S. Kamlesh, "Biodegradation of malachite green by wild mushroom of *Chhatisgrah*", *Journal of Experimental Sciences*, vol 2, pp. 69-72, 2011.
- [10] S. Abiodun y E. Ejiro, "Bioremediation of a Crude Oil Polluted Soil with *Pleurotus Pulmonarius* and *Glomus Mosseae* Using *Amaranthus Hybridus* as a Test Plant", *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, vol. 01, no. 03, 2010. Disponible: 10.4172/2155-6199.1000113 [Consultado: 03-oct-2022].
- [11] E. Villacres Manzano, "Análisis Toxicológico de Hidrocarburos Aplicado a la Salud Ocupacional", Tesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito. 2015.
- [12] E. Dadachova et al., "Ionizing Radiation Changes the Electronic Properties of Melanin and Enhances the Growth of Melanized Fungi", *PLoS ONE*, vol. 2, no. 5, p. e457, 2007. Disponible: 10.1371/journal.pone.0000457 [Consultado: 03-oct-2022].
- [13] Y. Prasad, y D. Sachin, "Biosorption of Cu, Zn, Fe, Cd, Pb and Ni by non-treated biomass of some edible mushrooms", *Asian Journal of Experimental Biological Sciences*, vol 4, no. 2, pp. 190-195, 2013.
- [14] J. Peña Gonzalez, "Procesos de biorremediación en el tratamiento de residuos sólidos del cigarrillo," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62316>
- [15] J.-D. Gu, D. T. Eberiel, S. P. McCarthy, y R. A. Gross, «Cellulose acetate biodegradability upon exposure to simulated aerobic composting and anaerobic bioreactor environments», *J Environ Polym Degr*, vol. 1, n.º 2, pp. 143-153, abr. 1993, doi: 10.1007/BF01418207.
- [16] C. J. Rivard *et al.*, «Effects of natural polymer acetylation on the anaerobic bioconversion to methane and carbon dioxide», *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 34, n.º 1, pp. 725-736, mar. 1992, doi: 10.1007/BF02920592.
- [17] J. Puls, S. A. Wilson, y D. Höltner, «Degradation of Cellulose Acetate-Based Materials: A Review», *J Polym Environ*, vol. 19, n.º 1, pp. 152-165, mar. 2011, doi: 10.1007/s10924-010-0258-0.
- [18] P. Biely, C. R. MacKenzie, J. Puls, y H. Schneider, «Cooperativity of Esterases and Xylanases in the Enzymatic Degradation of Acetyl Xylan», *Nat Biotechnol*, vol. 4, n.º 8, Art. n.º 8, ago. 1986, doi: 10.1038/nbt0886-731.

- [19] U. Tuor, K. Winterhalter, y A. Fiechter, «Enzymes of white-rot fungi involved in lignin degradation and ecological determinants for wood decay», *Journal of Biotechnology*, vol. 41, n.º 1, pp. 1-17, jul. 1995, doi: 10.1016/0168-1656(95)00042-O.
- [20] E. Fernández-Fueyo *et al.*, «A secretomic view of woody and nonwoody lignocellulose degradation by *Pleurotus ostreatus*», *Biotechnology for Biofuels*, vol. 9, n.º 1, p. 49, feb. 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0462-9.
- [21] C. Altaner *et al.*, «Regioselective deacetylation of cellulose acetates by acetyl xylan esterases of different CE-families», *Journal of Biotechnology*, vol. 105, n.º 1, pp. 95-104, oct. 2003, doi: 10.1016/S0168-1656(03)00187-1.
- [22] I. Ferreira da Silva, J. M. Rodrigues da Luz, S. F. Oliveira, J. Humberto de Queiroz, y M. C. Megumi Kasuya, «High-yield cellulase and LiP production after SSF of agricultural wastes by *Pleurotus ostreatus* using different surfactants», *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 22, p. 101428, nov. 2019, doi: 10.1016/j.bcab.2019.101428.
- [23] M. S. Rahman, S. Fernando, B. Ross, J. Wu, y W. Qin, «Endoglucanase (EG) Activity Assays», *Methods Mol Biol*, vol. 1796, pp. 169-183, 2018, doi: 10.1007/978-1-4939-7877-9_13.
- [24] R. M. Yennamalli, A. J. Rader, A. J. Kenny, J. D. Wolt, y T. Z. Sen, «Endoglucanases: insights into thermostability for biofuel applications», *Biotechnology for Biofuels*, vol. 6, n.º 1, p. 136, sep. 2013, doi: 10.1186/1754-6834-6-136.
- [25] M. Hosseini, «Advanced Bioprocessing for Alternative Fuels, Biobased Chemicals, and Bioproducts», Woodhead Publishing, 1st ed. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/advanced-bioprocessing-for-alternative-fuels-biobased-chemicals-and-bioproducts/hosseini/978-0-12-817941-3>
- [26] R. Updyke, «Biodegradation and Feasibility of Three *Pleurotus* Species on Cigarette Filters», The University of Maine, may. 2014. [En línea]. Disponible en: <https://digitalcommons.library.umaine.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1191&context=honors>
- [27] Jiménez, A. Reciclar colillas de cigarro en pro de economía circular - WORTEV. WORTEV Acelerador. Ecofilter. (2022, 29 junio). [En línea]. Disponible en : <https://wortev.com/historias-de-emprendedores/esta-empresa-recicla-las-colillas-de-cigarro-para-contribuir-a-la-economia-circular/>.
- [28] da Luz J, Paes S, Nunes M, da Silva M, Kasuya M. Degradation of Oxo-Biodegradable Plastic by *Pleurotus ostreatus*. *PLoS One*. 2013;8(8):1–8.
- [29] Cavazzalli JRP, Brito MS, Oliveira MGA, Villas-Bôas SG, Kazuya MCM. Lignocellulolytic enzymes profile of three *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler strains during cultivation on eucalyptus bark-based medium. *Food Agric Environ*. 2004;2: 291–297.
- [30] Pérez SR, Oduardo NG, Savón RCB, Boizán MF, Augur C. Decolourisation of mushroom farm wastewater by *Pleurotus ostreatus*. *Biodegradation*. 2009;19: 519–526.
- [31] Sánchez C. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnol Adv*. 2009;27: 185–194. pmid:19100826.
- [32] Cohen R, Persky L, Hadar Y. Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus *Pleurotus*. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2002;58: 582–594. pmid:11956739.
- [33] Lamia, MH, Farid, Z., Sonia, MA, Sevastianos, R., Samia, A., Véronique, D. y Mouloud K. Selective isolation and screening of actinobacteria strains producing lignocellulolytic enzymes using olive pomace as substrate. *Iranian J Biotechnol*. 2017; 15(1):74–7. Available from: <https://doi: 10.15171 / ijb.1278>
- [34] Mills, N. J., *Plastics: Microstructure and Engineering Applications*, (2005) Amsterdam: Butterworth-Heinemann. Elsevier. Fourth Edition. Cap 3.
- [35] J. M. Rath, R. A. Rubenstein, L. E. Curry, S. E. Shank, y J. C. Cartwright, “Cigarette Litter: Smokers’ Attitudes and Behaviors”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 9, núm. 6, pp. 2189–2203, jun. 2012.
- [36] L. C. Hernandez-Rubio, “Estrategias para la Degradación de Colillas de Cigarrillo.”, Universidad Javeriana, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/50285/trabajo%20de%20grado%20%20Laura%20Camila%20Hernandez%20Rubio.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consultado el 03-oct-22]
- [37] J. Kainthola, A. S. Kalamdhad, V. V. Goud, y R. Goel, “Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion”, *Bioresour. Technol.*, vol. 286, p. 121368, ago. 2019.
- [38] K. Ziemiński, I. Romanowska, y M. Kowalska, “Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production”, *Waste Manag.*, vol. 32, núm. 6, pp. 1131–1137, jun. 2012.

- [39] P. Wang et al., "Effect of physicochemical pretreatments plus enzymatic hydrolysis on the composition and morphologic structure of corn straw", *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 502–508, ago. 2019.
- [40] L. Rojas y C. Liliana, "Alternativas de usos de la cascarilla de arroz (*Oriza sativa*) en Colombia para el mejoramiento del sector productivo y la industria", Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/33698>. [Consultado: 03-oct-2022].
- [41] J. M. R. da Luz, S. A. Paes, K. V. G. Ribeiro, I. R. Mendes, y M. C. M. Kasuya, "Degradation of Green Polyethylene by *Pleurotus ostreatus*", *PLoS One*, vol. 10, núm. 6, p. e0126047, jun. 2015.
- [42] M. Santo, R. Weitsman, y A. Sivan, "The role of the copper-binding enzyme – laccase – in the biodegradation of polyethylene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*", *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 84, pp. 204–210, oct. 2016.
- [43] A. Sivan, "New perspectives in plastic biodegradation", *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 22, núm. 3, pp. 422–426, jun. 2011.
- [44] E. F. Bermudez Lizarazo, "Estudio de factibilidad para el cultivo de hongo (*Pleurotus sp*) en la Finca Santa Elena del municipio de Suratá, Santander y comercialización en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana," Trabajo de grado, Universidad de Santander, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/ff09734e-78c6-41f7-a597-6528fac8b290>